

Robot humanoïde d'inspection et d'assainissement en boîte gants nucléaire

Jeremy SEYSSAUD¹, Julien FAVRICHON¹, Kevin GIRAUD-ESCLASSE¹, Philippe GIRONES¹, Najib MAHJOUBI¹
Sven BOCK², Philippe CAPDEPUY² and Cyril MOITRIER¹.

Abstract—Ce travail présente une évaluation de l'opportunité d'utiliser des robots humanoïdes en milieu nucléaire. Ce projet a utilisé la plateforme du DaRwIn-OP pour lui apporter les modifications nécessaires afin d'en faire un opérateur d'intervention en milieu nucléaire. Les deux axes de travail ont consisté à équiper l'humanoïde d'un capteur de mesure radiologique et d'une commande des bras par une caméra en champ profond. Les tests réalisés montrent la capacité de réaliser des mesures radiologiques au moyen du capteur intégré et la réalisation de frottis pour évaluer la contamination d'un objet.

I. INTRODUCTION

Cet article décrit les résultats du travail visant à utiliser un robot humanoïde dans un milieu nucléaire où l'irradiation et la contamination obligent à limiter l'intervention humaine. L'utilisation de la robotique anthropomorphe est motivée par l'idée qu'un humanoïde par sa capacité de bipédie, de préhension par les mains sont des atouts pour suppléer l'homme dans un environnement sévère ou hostile. En effet, son mode de locomotion terrestre offre l'avantage d'être, à priori, adapté à des terrains inaccessibles au mode de locomotion plus classique que sont les roues et les chenilles [1]. Sa faculté de saisir et manipuler avec les mains des objets pouvant être manipulés par un homme est vraisemblablement une opportunité, ainsi que la commande de ce type de robot par mimétisme des mouvements d'un opérateur situé à distance de la zone sensible [2]. C'est en ce sens que des travaux ont été entrepris sur une plateforme humanoïde afin d'évaluer l'opportunité d'en faire un opérateur d'assistance robotisé pour l'investigation en milieu nucléaire. Ces travaux font suite à l'analyse des possibilités offertes par un rapprochement entre l'industrie de l'A&D et la communauté robotique open-source [3]. Ce robot humanoïde est dénommé H@RI, acronyme français par Humanoïde d'Assistance Robotisé pour l'Investigation. On commencera par présenter les briques technologiques pré-existantes et utilisées dans ce travail, comme le robot humanoïde DaRwIn-Op [4] et le capteur radiologique qui est utilisé (II). Ensuite les travaux conduits sur la partie software de la plateforme, l'intégration d'une instrumentation nucléaire et la commande du robot sont présentés (Section III). Différents tests ont été conduits pour illustrer ce travail : des tests de la tenue

à l'irradiation de l'électronique embarquée, des tests de validation de l'intégration du capteur radiologique et enfin la capacité de télé-opéré sans contact pour la prise de frottis (Section IV).

II. PRÉSENTATION DE L'EXISTANT

Il est possible d'appréhender un robot comme l'adéquation entre un système hardware et middleware sur lequel un ensemble d'outils et de capteurs sont intégrés. C'est sur la base de ce postulat que nous proposons de présenter la plateforme utilisée ainsi que les outils qui ont été intégrés. Dans ce paragraphe, nous décrivons la plateforme du robot humanoïde (Section II-A) utilisée, le système software structurant l'ensemble des développements réalisés (Section II-B) et enfin le capteur radiologique qui a été intégré sur l'humanoïde (Section II-C). Les outils embarqués par le robot H@RI en font un opérateur d'intervention en milieu hostile à même de réaliser des mesures complétant les données utiles à la caractérisation radiologique d'un environnement nucléaire.

A. Hardware

Afin de s'épargner la charge de conception d'un nouveau robot humanoïde, l'utilisation d'une plateforme pré-existante à ce travail a été privilégiée. En l'occurrence, il a été décidé d'utiliser la célèbre plate-forme du DARwIn-OP (Dynamic Anthropomorphic Robot with Intelligence - Open Platform) commercialisée par la société ROBOTIS [5]. Le robot DARwIn-OP fait 45.5 cm de hauteur pour une masse totale de 2.8 kg. Ces caractéristiques de taille et de masse font que chacune des articulations est commandée par un seul servomoteur. Des servomoteurs MX-28 ont été développés spécifiquement pour ce robot afin d'avoir une meilleure résolution et vitesse de communication en comparaison des servo-moteurs du type RX-28 notamment en utilisant des méthodes de contrôle de type PID [6]. Le robot DARwIn-OP est nativement distribué avec un contrôleur principal Intel Atom Z530 @ 1.6 GHz avec une RAM de 1 GB et une mémoire de 4 GB. La communication avec le DARwIn-OP se fait via des ports externes du type HDMI, USB, mémoire flash, Ethernet ou encore Wi-fi. Le robot est alimenté par des batteries au lithium.

B. Firmware

La plateforme est livrée avec le système d'exploitation Linux Ubuntu 9.10. Le framework open-DARwIn-SDK, en langage de programmation C++, a été spécifiquement réalisé

¹ Commissariat à l'Energie Atomique, CEA-Marcoule, BP 17171, F-30207 Bagnols-sur-Cèze Cedex, France
philippe.girones@cea.fr

² Génération Robots, 1, Rue Théodore Blanc, F-33049 Bordeaux Cedex, France sb@generationrobots.com

pour cette plate forme. L'équipe qui l'a développée a souhaité en faire une architecture modulaire [7] rassemblant toutes les fonctions nécessaires : communication, marche, vision, etc. Afin que les développements réalisés au cours de ce travail ne soient pas spécifiques à ce robot, le framework a été modifié, comme discuté à la Section III-A.

C. Outils

H@RI doit pouvoir contribuer à la caractérisation de l'état radiologique des zones dans lesquelles il opère. Parmi les différentes techniques d'analyse, la spectrométrie gamma a été retenue, elle permet d'identifier et quantifier les radionucléides émetteurs gamma. H@RI a été équipé d'une sonde de spectrométrie gamma dont il a fallu assurer l'intégration tant au niveau hardware que software. La petite taille de cette plateforme humanoïde a nécessité d'employer une chaîne de spectrométrie gamma de taille et de masse réduite. Ces précautions sont importantes pour permettre une intégration aisée à la structure du robot sans en perturber son modèle dynamique. La sonde GR1, commercialisée par la société KROMEK, de dimension $62 \times 25 \times 25$ mm et d'une masse de 60 g, a été privilégiée. Cette sonde utilise un capteur CdZnTe (Cadmium Zinc Telluride) sensible aux rayonnements γ sur une plage énergétique comprise entre 30 keV et 3 MeV [8]. Ce type de capteur est utilisable à température ambiante. Le travail d'intégration de ce capteur radiologique est présenté à la Section III-B.

III. DÉVELOPPEMENTS RÉALISÉS

Dans cette section, nous proposons de présenter les travaux réalisés sur H@RI pour en faire un robot-opérateur capable d'intervenir en milieu nucléaire. Tout d'abord, la carte mère et le système d'exploitation ont été modifiés de façon à pouvoir supporter l'ensemble des développements qui ont été réalisés sur ce robot (Section III-A). L'intégration de la sonde de spectrométrie gamma est ensuite décrite (Section III-B). La commande de cette plateforme a été appréhendée en trois temps : la marche de H@RI est contrôlée via une manette de jeu vidéo (Section III-C.1) tandis que ses bras reproduisent le mouvement de ceux d'un opérateur distant du lieu d'intervention, au moyen d'une caméra de profondeur (Section III-C.3), des pinces en bout de bras de H@ri sont commandées via un gant instrumenté (Figure 1).

A. OS, hardware et middleware

La mémoire de la carte mère d'origine limite la quantité de données stockée sur ce support. Un premier travail a consisté à remplacer cette carte par un modèle Samsung Exynos5422 ARM® CortexTM-A15 Quad 2.0 GHz avec une RAM de 2 GB. La mémoire est ajustable avec des tailles de 16, 32 ou 64 GB.

La version du système d'exploitation Ubuntu 9.10 n'est plus maintenue depuis avril 2011. Cela limite la possibilité de mises à jour de logiciels. Cela a motivé la migration vers une version Linux du type Lubuntu 14.04 dont la maintenance est prévue jusqu'en avril 2019. De plus, la légèreté de l'environnement d'exploitation est adaptée à ce

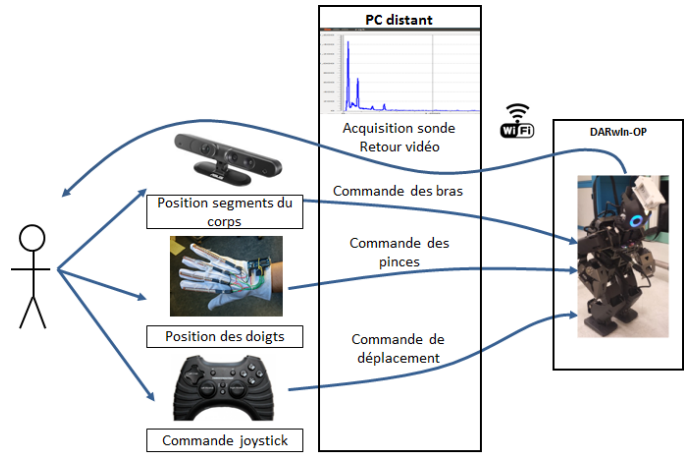


Fig. 1: Architecture fonctionnelle

projet notamment en raison d'une consommation d'énergie et d'une mobilisation de la RAM inférieure à la version Ubuntu classique.

Le framework proposé avec le robot DARwin-OP est lié à cette plateforme humanoïde ce qui rend difficile la portabilité des développements entre différentes plateformes. De nos jours, il existe un grand nombre de middlewares propriétaires ou open-sources comme par exemple ROS, MOOS, ORO-COS, etc. Le middleware Robot Operating System (ROS), basé sur un mode de partage open-source, est actuellement largement répandu dans le domaine de la robotique ce qui permet le partage des contributions de développeurs externes [9]. ROS peut être perçu comme un ensemble de programmes ou noeuds interconnectés, constituant le système d'exploitation d'un robot. Il offre également un standard de communication entre les différents programmes et langages de programmation associés. Le choix de ce middleware pour ce projet offre ainsi la possibilité d'une intégration rapide et flexible de développements sur différentes plateformes [10]. Ainsi, lors de la migration du framework open-DARwin-SDK vers ROS, il a été nécessaire de créer le noeuds ROS de commande de la cinématique de H@RI. Et au lieu de créer le noeud à partir du framework open-DARwin-SDK, un noeud équivalent, développé par l'Institut de Robòtica i Informàtica Industrials (Universite de Barcelone), a pu être utilisé [11].

B. Instrumentation nucléaire

H@RI doit pouvoir réaliser des mesures par spectrométrie gamma afin de déterminer les radionucléides présents lors d'une intervention en milieu nucléaire. Étant donné la taille de H@RI qualifié de « baby-size », il est indispensable que les dimensions des capteurs utilisés soient réduites. La fixation de la sonde sur H@RI ne doit pas venir perturber la cinématique globale du robot comme la marche ou bien encore le mouvement des bras. Ainsi, pour éviter ses inconvénients, la sonde GR1 a été fixée sur la tête de l'humanoïde. Cette fixation a été réalisée au moyen d'un support fabriqué en impression 3D dans lequel la sonde est maintenue (Figure 2). Un exemple d'acquisition au moyen de cette sonde est



Fig. 2: Sonde GR1 fixée sur la tête de H@RI

présenté à la Section IV-B.

C. Commande du robot H@RI

La commande de H@RI en télé-opération est faite en deux temps, soit en pilotant les jambes du robot (Section III-C.1), soit en pilotant les bras de celui-ci (Section III-C.3) et ses pinces (Section III-C.1).

1) *Commande de la marche*: Une manette de jeu est utilisée pour commander la marche de H@RI. Elle dispose de deux joysticks : l'un servant à commander la marche avant-arrière et l'autre pour commander la rotation du robot sur lui-même.

Cette manette est également utilisée pour alterner entre la commande des jambes et des bras. La commande de la marche pourrait être faite également au moyen du clavier d'un ordinateur. Toutefois, la solution d'une commande par manette de jeu est privilégiée étant donné le fait que l'opérateur doit être face à la caméra de profondeur utilisée pour la commande des bras (Section III-C.3).

2) *Commande des bras*: On propose de contrôler les bras de l'humanoïde par une méthode de capture de mouvement en utilisant une caméra de profondeur ASUS. L'objectif est ainsi de télé-opérer H@RI sans avoir pour autant à instrumenter un opérateur. Dans ce cas, les gestes de l'opérateur sont l'équivalent d'une interface homme-machine. Cette méthode de pilotage sans contact est une manière intuitive de commander les bras de H@RI pour un opérateur.

3) *Commande des pinces*: La commande des bras du robot par caméra de profondeur rend impossible l'utilisation simultanée de la manette de jeu. Pour cette raison, on propose de piloter les pinces de H@RI via des gants instrumentés. Ses gants permettent une commande intuitive d'ouverture/fermeture des pinces, proportionnelle à la courbure des doigts de l'opérateur.

IV. TEST

Dans ce paragraphe, nous proposons d'illustrer les différents tests réalisés avec le robot H@RI tel que livré par ROBOTIS. Au paragraphe IV-A, nous présentons les tests d'irradiation réalisés sur les parties sensibles du robot. Ensuite, nous décrivons les tests de validation de l'intégration

de la sonde GR1 en utilisant des sources radioactives de calibration (IV-B). Finalement, des tests ont été réalisés pour valider l'utilisation d'une caméra champ profond pour commander les bras de H@RI à distance (IV-C).

A. Test en irradiateur

Un point clé devant être analysé pour l'utilisation d'un robot en milieu radiatif est la résistance aux rayonnements ionisants des composants électroniques embarqués. En effet à cause des dommages induits par les radiations, il est nécessaire d'estimer la dose maximale admissible par les composants électroniques. La connaissance de cette valeur maximale est importante pour estimer la fiabilité et les performances du système en environnements irradiants. On s'intéresse plus spécifiquement aux rayonnements ionisants γ émis par les éléments radioactifs. Dans notre cas, ce type de rayonnement dit « pénétrant » ne peut pas être stoppé au moyen d'un blindage lourd et volumineux, ce qui nécessite d'évaluer les conséquences de l'interaction de ces rayonnements au niveau des composants électroniques. L'impact du rayonnement peut être évalué par la mesure de la dose totale absorbée qui représente l'énergie déposée par ionisation dans la matière. Cette dose totale absorbée représente l'effet des radiations, propriété la plus importante pour les systèmes robotiques évoluant dans des environnements irradiants. Le durcissement des composants électroniques dépend des technologies utilisées, des processus de fabrication ou encore de la complexité des sous-systèmes constituant une carte électronique. On distingue les composants durcis par fabrication et les composants commerciaux (non-durcis). Toutefois, on notera la capacité de certains composants commerciaux de posséder des propriétés de tenue à l'irradiation équivalentes à celle des composants durcis. Hors il n'existe pas, à notre connaissance, de données sur le comportement sous rayonnement γ de l'électronique du robot DARwIn-OP. Et c'est pour cette raison qu'il a été décidé de réaliser des tests dans un irradiateur au Cobalt-60 afin de prédire le comportement sous rayonnements γ de l'électronique embarquée et d'en estimer la vulnérabilité. Pour cela, la simulation du dépôt d'énergie est réalisée dans un irradiateur panoramique équipé d'une source Cobalt-60. La position dans le bunker permettant d'atteindre le débit de dose souhaité est évaluée par simulation avec le logiciel RayXpert (Figure 3). L'électronique du robot H@RI est constituée des éléments suivants :

- Adaptateur PC2i,
- Contrôleur CM-730,
- Carte d'interface,
- Carte d'alimentation,
- Head board.

En plus de ces composants électroniques, il est important de s'assurer du bon fonctionnement des capteurs embarqués. Dans le cas du robot H@RI, la conséquence de rayonnement γ a été analysée sur les capteurs suivants,

- Haut Parleur,
- Caméra HD de 2MPx,
- Deux ventilateurs,

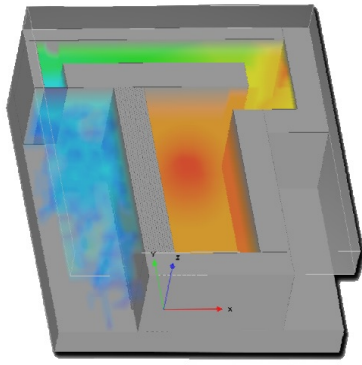


Fig. 3: Irradiateur Cobalt-60 : simulation des débits de dose par Rayxpert (à gauche) et vue de l'intérieur du bunker (à droite)

- Accéléromètre,
- Gyroscope,
- Servomoteur MX-28T.



Fig. 4: Kit des composants électroniques (à gauche) et servomoteur MX-28T (à droite)

Les servomoteurs MX-28T sont utilisés comme actionneurs et sont équipés d'une mémoire numérique dont il est nécessaire d'évaluer le fonctionnement sous irradiation. Le comportement des matériaux métalliques ou isolants n'a pas été considéré dans ce cas, les énergies auxquelles sont observées des altérations des leurs propriétés se situent à des niveaux de dose de plusieurs milliers de Grays.

L'irradiation des composants a été réalisée afin de simuler une dose totale cumulée de 1024 Gy à une température réglée à 20°C. Les irradiations ont été réalisées avec un débit de dose de 0.21 Gy.h⁻¹ jusqu'à 136 Gy puis à 0.6 Gy.h⁻¹ jusqu'à 1024 Gy. Le profil des irradiations est résumé au Tableau I. Les composants ont été polarisés durant leur irradiation de façon similaire à une utilisation normale de la plateforme humanoïde. Une méthodologie a ensuite été mise en place pour tester différentes fonctions de l'adaptateur PC2i du robot H@RI tel que le port USB, la sortie vidéo, l'écriture sur le disque, le port Ethernet et le wifi. Les tests mis en place sont répétés à chacun des paliers d'irradiation, tels que définis au Tableau I, jusqu'à l'observation d'une défaillance. Lorsqu'une défaillance est détectée sur un des composants, celui-ci est remplacé afin de poursuivre l'irradiation des autres composants. Une procédure de test a été

mise en place pour évaluer à chaque palier d'irradiation l'état des composants. Ces tests ont été les suivants :

- 1) **Caméra** : Une photo est prise à l'intérieur du bunker à la lumière et une seconde photo en ayant préalablement positionné un cache opaque devant l'objectif.
- 2) **Ventilateurs** : Ils sont démarrés pour une vérification visuelle de leur fonctionnement.
- 3) **Microphone, haut-parleur, USB, écriture disque, accès réseau (ethernet, wifi)** : Des procédures de tests du système d'exploitation Ubuntu sont lancées pour vérifier le bon fonctionnement de chaque sous-système.
- 4) **Accéléromètre et gyroscope** : Une procédure d'écriture des données envoyées par ses capteurs est lancée. Le test consiste à vérifier que les capteurs sont en capacité de renvoyer des valeurs.

Les doses cumulées observées à la défaillance sont résumées au Tableau II pour l'ensemble des sous-systèmes testés. L'accéléromètre ainsi que le gyroscope ont été testé via le

Sous-système	Dose cumulée (en Gy)
Adaptateur - PC2i	200
Contrôleur CM-730	300
Head board	1014
Ventilateurs	200
Haut parleur	430
Caméra HD 2Mpx	200
Servomoteur MX-28T	1400

TABLE II: Dose cumulée mesurée à la défaillance du sous-systèmes

contrôleur CM-730. Comme les servomoteurs ont continué de fonctionner jusqu'à une dose de 1024 Gy, les irradiations ont été poursuivies jusqu'à défaillance qui a été observée à une dose de 1400 Gy. En conclusion de ce travail, on estime que H@RI peut fonctionner jusqu'à une dose cumulée totale de 200 Gy (défaillance de l'adaptateur - PC2i et de la caméra HD). Sur des installations nucléaires en démantèlement, particulièrement dans les cellules hautes activité, le débit de dose

Palier de dose cumulée (Gy)	0	5	10	15	20	33	44	53	67	82	87	101	121	136	232	330	428	525	623	720	832	916	1024
Température dans le bunker (°C)	19	19	19	20	20	20	19	20	20	20	19	20	21	21	21	21	22	22	22	22	22	22	22
Débits de dose (Gy.h ⁻¹)	0.21														0.6								

TABLE I: Paliers des irradiations

de référence pour le développement des systèmes complexes est de 0,1 Gy.h⁻¹ [12], soit 2000 heures de travail pour le robot H@ri. On peut également citer comme repère que cela représente 10 ans de travail pour un opérateur soumis à la législation française. Cette limite est qualifiée pour un environnement où seul le rayonnement gamma est présent. Comme cela a été indiqué précédemment, ces composants n'ont pas été conçus de façon à être résistants aux radiations. En conséquence, il serait nécessaire de réaliser un nombre de test suffisant au sens statistique pour définir un niveau de tenue au radiation et de confiance associé.

B. Test de la sonde GR1

Des tests ont été réalisés afin de valider l'intégration de la sonde GR1 sur le robot H@RI en utilisant des sources radioactives étalons. En l'occurrence des sources de Césium-137 et d'Europium-152 ont été utilisées pour ces expériences. Ce type de source est communément utilisé en laboratoire pour tester les fonctionnalités de sondes de mesure. Pour réaliser ces expériences, le robot H@RI est équipé d'une sonde GR1 et placé face aux sources étalons (Figure 5).

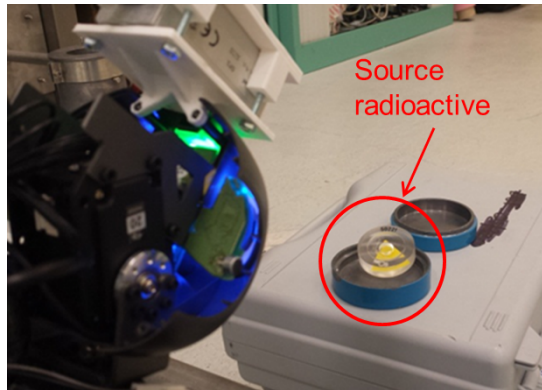


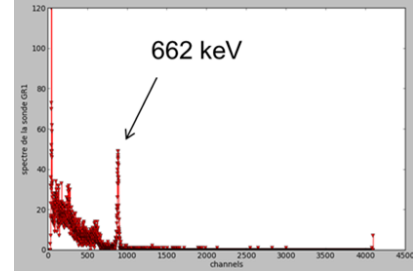
Fig. 5: H@RI lors de l'acquisition face à une source de Césium-137

Les caractéristiques de ces acquisitions sont reportées au Tableau III.

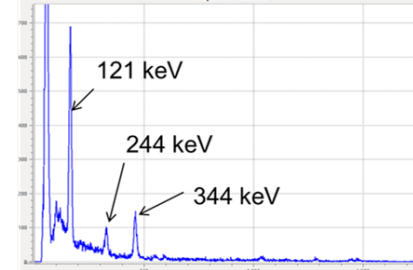
Source	Césium-137	Europium-152
Distance de la source (cm)	30	20
Temps d'acquisition (min)	5	3
Nombre de coups (surface nette)	9556	58962

TABLE III: Caractéristiques des acquisitions

Les spectres de chacune des sources ont été analysés pour



(a) Césium-137



(b) Europium-152

Fig. 6: Spectres gamma _ sonde GR1 embarquée sur H@RI

qualifier l'intégration de la chaîne de spectrométrie gamma (Figure 6).

On notera que l'on retrouve des raies caractéristiques des éléments radioactifs utilisés : 662 keV pour le Césium-137 et (121 keV ; 244 keV et 3444 keV) pour l'Europium-152. Cet expérience valide l'intégration de la sonde spectrométrie gamma GR1 sur le robot H@RI. Le résultat de l'analyse montre que l'intégration de la chaîne de spectrométrie gamma dans l'architecture du robot ne dégrade pas la qualité des spectres : résolution et rendement.

C. Test de commande du robot H@ri

Un dernier test a consisté à simuler une opération dans laquelle le robot H@RI doit pouvoir se déplacer pour se positionner face à un élément sur lequel il doit réaliser un frotts. Ce test est représentatif de missions pouvant avoir lieu dans des milieux contaminés à savoir le contrôle de la contamination surfacique non fixée. Pour cela, le frotts est un moyen efficace et commode de prélever des échantillons sur des surfaces contaminées par de la matière radioactive. Lors d'intervention en milieu contaminant et irradiant, le personnel doit être équipé d'équipements et tenues adaptées. La contamination radioactive désigne le processus de dépose sur un objet ou un être de produit radioactif. La contamination est un phénomène distinct de celui de l'irradiation



(a) Se déplaçant vers sa zone de travail

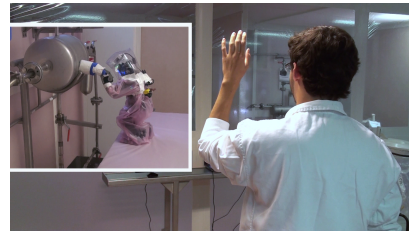


(b) En position pour réaliser un frottis

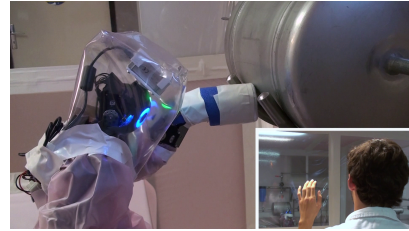
Fig. 7: Robot H@RI habillé d'une tenue vinyle

qui a été traité dans la Section IV-A. Ainsi, afin de pouvoir manipuler un disque de frottis, une prothèse est fixé dans l'une des pinces du robot H@RI sur laquelle le frottis est fixé. Lorsqu'un risque de contamination est identifié, la réglementation impose au personnel d'intervention d'être équipé de tenue vinyle.

Cette philosophie a été retenue pour équiper le robot H@RI afin de le prémunir d'une contamination éventuelle (Figure 7). Le déplacement dans la zone de travail a été réalisé au moyen de la manette de jeu via une communication WIFI. L'ajout de la sonde GR1 sur la tête de H@RI semble avoir perturber le centre de gravité de la plateforme ce qui conduit à une erreur dans la posture d'où une instabilité dans la marche du robot. Pour contrer une bascule vers l'avant lors d'un déplacement, les pieds de H@RI ont été simplement rehaussés afin de compenser ce déséquilibre. Bien évidemment, il sera nécessaire de prendre en place un stabilisateur qui prendra en compte les données du gyroscope, accéléromètre et de capteurs de forces. Cet algorithme de stabilisation permettra de compenser l'impact dû à l'ajout de masse supplémentaire. La seconde phase de cette expérience a été de réaliser le frottis sur une cuve représentative des équipements d'une installation nucléaire. Le pilotage des bras du robot H@RI a été réalisé par un opérateur à distance de la zone de travail. L'opérateur à distance mime les gestes pour réaliser un frottis et les mouvements du corps sont scannés au moyen d'une caméra ASUS et reproduits par H@RI. La Figure 7 illustre la réalisation d'un frottis tel que décrit. Comme on peut l'apercevoir l'opérateur est séparé du lieu d'intervention par un sas vinyle (Figure 7c) utilisé couramment en milieu nucléaire pour assurer un confinement de la contamination. Cette expérience illustre bien la capacité de suppléer l'homme dans une intervention en milieu sévère. Ce cas test ne nécessitant pas l'utilisation des pinces, des essais d'utilisation du gant instrumenté ont été réalisés séparément et se sont avérés concluant. On voit



(c) Opérateur mimant avec ses bras la réalisation d'un frottis



(d) H@RI reproduisant les mouvements de l'opérateur

Fig. 7: Robot H@RI commandé par capture des mouvement de l'opérateur pour faire un frottis

ici comment la commande d'un robot humanoïde peut être une solution à la réalisation de multiples tâches sans toutefois avoir une conception spécifique au regard des missions qu'il aura à réaliser. Autrement dit, le robot humanoïde apparaît comme une alternative au développement de robot dédié comme cela est réalisé dans le domaine du nucléaire.

V. CONCLUSIONS

L'utilisation d'un humanoïde de petite taille, DARWIN-Op, comme assistant en environnement nucléaire pour la réalisation de différentes tâches : investigation, assainissement [3], est démontrée. Ce résultat a été obtenu, d'une part, en intégrant dans le robot une chaîne de spectrométrie gamma pour la caractérisation radiologique de son environnement en lecture directe ou par prélèvement. D'autre part, grâce à la capture des mouvements du tronc d'un opérateur distant pour la commande des bras et enfin grâce au développement d'une tenue de confinement du robot et des essais d'irradiation (tenue à : 200Gy). La combinaison des commandes innovantes proposées, innées pour l'opérateur, améliore la télé opération, en particulier pour des opérations d'assainissement qui exigent des manipulations délicates. L'intégration du système et le développement de nouvelles fonctions dans l'écosystème ROS est également une réussite grâce à l'universalité des travaux réalisés.

A ce stade, il est permis de projeter les résultats de ces travaux dans des conditions d'utilisation plus complexes, en particulier dans des zones où le sol est encombré. Dans cette perspective, on relève des problèmes de stabilité du robot pour le déplacement, constat qui fragilise la faisabilité de l'approche du robot H@ri vers la zone d'intervention où il excelle. Ainsi, l'exploitation des systèmes anthropomorphes pour l'A&D est un support pour les travaux de fiabilisation de la marche des humanoïdes en milieux sévères. De plus,

d'autres axes de travail se dégagent pour répondre à l'adaptation du robot en milieux sévères. Il s'agit notamment de traiter les aspects de contamination du robot ou encore de l'amélioration de la tenue à la dose du robot pour répondre aux conditions extrêmes.

REFERENCES

- [1] L. Bruzzone and G. Quaglia, "Review article : locomotion systems for ground mobile robots in unstructured environments," *Mechanical Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 49–62, 2012.
- [2] M. Do, P. Azad, T. Asfour, and R. Dillmann, "Imitation of human motion on a humanoid robot using non-linear optimization," in *Humanoid Robots, 2008. Humanoids 2008. 8th IEEE-RAS International Conference on*, Dec 2008, pp. 545–552.
- [3] J. Seyssaud, P. Gironès, C. Ducros, J. Favrichon, and Y. Soulabaille, "Robotic d&d : Smart robots-15093," in *Waste Management Conference*, Phoenix, Arizona, 2015. [Online]. Available : <https://hal-cea.archives-ouvertes.fr/cea-01232697v1>
- [4] I. Ha, Y. Tamura, H. Asama, J. Han, and D. W. Hong, "Development of open humanoid platform DARwIn-OP," in *SICE Annual Conference (SICE), 2011 Proceedings of*. IEEE, 2011, pp. 2178–2181.
- [5] "Robotis," <http://www.robotis.fr/>, accessed : 2015-10-29.
- [6] I. Ha, Y. Tamura, H. Asama, J. Han, and D. Hong, "Development of open humanoid platform darwin-op," in *SICE Annual Conference (SICE), 2011 Proceedings of*, Sept 2011, pp. 2178–2181.
- [7] "Framework," <http://support.robotis.com/en/product/darwin-op/development/framework.htm>, accessed : 2015-11-27.
- [8] C. Le Goaller, P. Gironès, F. Lamadie, and C. Mahé, "In-situ nuclear measurement for decommissioning : Recent trends and needs," in *IAEA, International Conference on Lessons Learned from Decommissioning of Nuclear Facilities and the Safe Termination of Nuclear Activities, Athens, Greece*, 2006.
- [9] W. Woodall, M. Liebhardt, D. Stonier, and J. Binney, "ROS Topics : Capabilities," *Robotics Automation Magazine, IEEE*, vol. 21, no. 4, pp. 14–15, Dec 2014.
- [10] M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, u. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, and A. Y. Ng, "ROS : an open-source Robot Operating System," in *ICRA workshop on open source software*, vol. 3, no. 3.2, 2009, p. 5.
- [11] "Institut de robòtica i informàtica industrial," <http://www.iri.upc.edu/>, accessed : 2015-10-29.
- [12] P. Gironès, B. Laurence, and D. Christian, "First report from an advanced radiological inventory for a spent fuel reprocessing plant."